

コンピュータ・サイエンスの教育と他の諸科目の教育

宮 本 光 雄 訳

A Translation of “The Teaching of Computer Sciences and the Teaching of Other Subjects”

Mitsuo MIYAMOTO

はじめに（訳者）

これは、「経済開発協力機構」(Organization for Economic Cooperation and Development)の下部組織の一つである「教育研究革新センター」(Centre for Educational Research and Innovation)と、フランス文部省の「協力局」(Direction de la Coopération)との共催によって、1970年3月9日から14日にかけてパリ近郊セーヴルの「国際教育研究センター」(Centre International d'Etudes Pédagogiques)において開かれた『中等教育におけるコンピュータ・サイエンスに関するゼミナール』(Seminar on Computer Sciences in Secondary Education, ここでの成果は、OECDによって、1971年にこの名の表題のもとに書物として刊行された。)の第3部会「コンピュータ・サイエンスの教育と他の諸科目の教育」(The Teaching of Computer Sciences and the Teaching of Other Subjects)に関する二編の論文、『諸教科の教育に対するコンピュータ・サイエンス教育の影響』(The Influence of Computer Science Instruction on the Teaching of School Subjects)と『中等学校カリキュラムにおける他の諸科目とコンピュータ・サイエンスの統合』(Integration of Computer Sciences with Other Subjects of the Secondary School Curriculum)の翻訳である。

なお、訳出にあたって、原文のイタリック体の部分には傍点を付し、引用符号を付されている部分は「 」であらわし、書名・論文等は『 』であらわした。

諸教科の教育に対するコンピュータ・サイエンス教育の影響

M. G. フェリングドン (Mr. M. G. Farringdon)

連合王国, スウォンジーのユニバーシティ・カレッジ, コンピュータ・サイエンス学部

中等学校カリキュラムにおいてコンピュータのもっている意味は、本質的に、コンピュータが計画立案により方法を与えるということである。コンピュータ・サイエンスは、諸問題を解決したり、また新しい方向づけをしたりする方法を提供する。このことは、ここ数年間、生徒が把握するのに非常に重要な概念である現代数学^{レタパス}の教授細目^{バス}の中のフローチャートの概念で明らかにされた。コンピュータは、この概念をわからせるのに強い起動力を提供した。そして一旦この概念が理解されれば、この概念は今日の社会における他の多

くの諸概念を理解するのに役立つのである。

いま、はげしく論じられた問題——即ち、コンピューティングはそれ自体正当な一科目として教授されるべきか、あるいはコンピューティングの知識は学校中の多くのコースに挿入されるべきかという問題——を簡単に考察することは価値あることである。コンピューティングを独立の科目として支持する人々は、この科目が多数の他の教科の間でばらばらな展開をさせられるのは賢明でないと主張する。というのは、彼らは、このコースが当然ある共通の構造をもつことになり、他の諸科目に直接影響を与えることになると感じるからである。しかしながら、この見解をとる人々は、専門家養成のための教育を行うというわなにあまりにもやすやすと陥ちいるように思われる。ところがわれわれは、コンピューティングの非専門家を教育することに専念すべきだと私は信じている。有効にこれを行うためにわれわれは、コンピューティングの知識を非常に多くのコースに挿入するという、第二案を考えるべきである。マーシャル・マクルーハン (Marshall McLuhan) は、その論拠を次のように述べている。

「教育において、カリキュラムを諸科目に分割する伝統的な方法は、ルネサンス以後の中世の三学や四学と同じようにすでに時代遅れになっている。どの科目をとって見ても、深いところでは、直ちに他の諸科目に関係する。第3学年あるいは第9学年の演算は、数論・記号論理学・文化史に関係づけて教えたなら、問題の単なる練習にとどまらなくなる。もし断片的で無関連な現在の型が続けられるならば、われわれの学校カリキュラムは、全市民に彼らが生活しているサイバネティックスの世界を理解しにくくするのは確かであろう。」

明らかに、如何なる嚴重な法則もありえないであろう。連合王国において、国立コンピューティング・センターの『学校のためのコンピュータ理解』(Computer Appreciation for Schools) のパッケージは、コンピュータやプログラミングの二学期間の短期専門家養成コースと、既定諸教科に対するコンピュータの社会学的意味や影響に関する一般コースとを提供している。一般コースは、様々の異なった科目の教師たちを含むことが意図されており、その副産物として、私は、コンピュータの応用と意味が既定諸科目において論議される一つの過程が学校中に進行し始めることを願うのである。専門家のためには、コンピュータ・サイエンス・コースが常に要求されるであろうが、非専門家のためには、深さよりも、親しみをもたせることがねらいである。後者にとっては、コンピューティングの応用の評価に対する関心こそが重要なのであって、ささいな技術的な面が重要なのではない。

ワティンガー (Oettinger) が示すように、道具としてのコンピュータと行為者としてのコンピュータという、コンピュータには二つの別個の、そして補充的な役割がある。道具としてのコンピュータの役割は、恐らく比較的広く認められ、かつ容易に理解されている。例えば、ロケットを月に往復させるのに要する計算の統計を考えることができるということなどである。この点でコンピュータは非常に有用な道具である。けれども、行為者としてのコンピュータの役割はもっと重要である。というのは、コンピュータは諸理論の発展に積極的に関与することができるからであり、このような仕方で使用されるコンピュータは実験科学における創造的・人間的な要素に対する必要を強めるからであり、また、

創造的な想像力をもった人間的な科学者が解答を求めてコンピュータを操作するために必要とされるからである。

ワティンガーが述べるように、

「現代のコンピュータは、非常に多様な機能あるいは構造的な役割を演ずる準備のできた非常に多才で便利なブラック・ボックスである。自然科学においては、スクリプトが通常、あらかじめ数学でかかれているところに、コンピュータが数学によって暗示されていた役割をそのプログラムを通じて単に生き返らせるにすぎない。アイザック・ニュートン(Isaac Newton)は、微分方程式の簡潔な速記法で天体力学のためのスクリプトを描写した。ウーバン・ルヴェリエ(Urbain Leverrier)とジョン・クーチ・アダムズ(John Couch Adams)は、苦心して、豊富な天体観測に基づく長くて詳細な計算を含んだスクリプトにおいて彼らの才能をためた。ジョハーン・ガレ(Johann Galle)とジェイムズ・チャリス(James Challis)は、いわば計算通りのところに彼らの望遠鏡を向けた。そして海王星が発見された。現代の専門語で言えば、ルヴェリエとアダムズはおおのニュートンのモデルに基づいた海王星のシミュレーションを行った。そしてそのモデルに対する信頼は、シミュレーションの出力と実験とを比較することによって強められた。コンピュータは、現在、ヒューストンやハンツヴィルやケープ・ケネディで衛星や軌道を常規的に遊動させている。」

行為者としてのコンピュータは、たとえ堅実な業績が道具としてのコンピュータの業績より少ないとしても、忘れられるべきではない。

近頃、コンピュータを使用する大抵の人は、コンピュータが単に巨大な「数学処理機」ではないということを了解しているが、去年出版されたプログラミング・ブックの価値を減じた次のような所説を今でも見出し得るのである。

「ディジタル・コンピュータは、数を合計することができ、しかもそれを非常にすばやく行い得る機械である。」

確かに、可能で望ましい場合に、コンピュータインテグレーションの教育と他の諸科目の教育を統合することによって、この間違った見解は訂正されるであろう。明らかに、数学と数学的基礎を非常に頼りにしている諸科目は、コンピュータ使用において最前線となっており、またコンピュータの敏速な計算能力と記憶容量を利用することをもくろんだ新方法を開発することにおいても最前線となっている。しかしながら、数学をほとんどあるいは全く頼りにしていない多くの科目でも、コンピュータを使用しているし、そして来る10年以内にその主要な使用者となるであろう。現在、コンピュータを、記号操作者——そこでは、単に数が特別な性質をもった一連の記号となっているのだが——としてみなすことを若い人々に教えることが大切である。

幾分かはこの理由のために、また幾分かはこのコンピュータがわれわれの生活様式に影響を及ぼしていくであろうという理由から、大部分の学校人をコンピュータインテグレーションに触れさせることが必要だと思う。触れさせるのは、コンピュータが何をすることができ、何ができないかに、また使用者が何をしなければならないかに、重点を置く心構えでなされるべきである。例えば、論理的な方法で問題を解決するという考えは、われわれがある解答に接近する時の自由に制限を加えるが、その代わりに、論理的な状況の中で情報を巧みに

処理する能力を与える。他方、特定の言語によってプログラムを作成するコースは、悪い触れさせ方である。というのは、コンピュータ用言語を理解するということは、問題解決のためにコンピュータの扱い方を理解するということを意味しないからである。

提示された解答が為になるよりも害になる誤報を広げていないことを確実にするために、コンピュータで解答を得ようとする諸問題をチェックすることに十分な注意を払う必要がある。グルンバーガー (Gruenberger) はこのことを次のように指摘している。

「コンピューティングに関する SMSG ブック (高校生向き) の初版は、ありふれた例によって解決する問題を生徒たちに紹介した。これは、彼らが確実に理解できるような簡単な例になるよう意図されていた。即ち、自動車のガソリン・マイル数の計算の仕方などである。彼らは、ステッパーが『ガソリン・タンクを空にせよ。』であるというようなアルゴリズムの形式でそれを提示した。これは、その問題に取り組むためには全く間違った方法である。それは全くばかげている。…それは、興味ある新しい問題を火の中に投げ込むか、あるいはあなたが自動車をひっくり返す仕方を学ばねばならないかのいずれかである。…」

もしわれわれが問題を解決するためにコンピュータの扱い方を人々に示そうとするなら、問題を正しく解決する仕方を二、三の例で彼らに示す義務がある。生徒たちに悪い解答を示すことは (たとえ解答が成り立つとしても) 単に悪いコンピューティングを助長するだけである。」

最近、コンピュータ教育を導入する問題に取り組んでいるほとんどの学校は、数学の教授細目の中でコンピュータ教育を行っている。それは、一般に歴史的な理由からであり、また、表面上、最も容易に「適合する」ように思われるからである。余分な負担がほとんど全く数学の教師たちに負わされている。やや同じ論拠に従って、私は数学の一分野——即ち統計学——から一例をながめることを提案しようと思う。それは多数の他の科目にもあてはまる実例なのである。

例えば、統計学は、非常に数学的な基礎をもつ科目に加えて、植物学や動物学のような自然科学に広く使用されている。また地理学において、特に地理学の社会的・経済的局面においては、例えば、開拓地の地域型や地方的・地域的な経済状態の分析が研究され、その上、経済生活の特性や集約度における空間的諸変化の背後諸要因も研究される。政治地理学は、選挙地理や地方自治行政の空間的な諸問題の研究をも包含するであろう。開拓地の地理においては、開拓地の諸類型の発達、都市生活の初期の発展と共にそれらの関連ある農業や社会のシステムを包含して、研究される。これらの諸研究はすべて、統計学的データ処理によって恩恵を被むるし、また統計学的方法は、今日の地理学者に非常に密接なものになりつつある。

歴史家たちは、ある特定の地域の特定の期間における出生・結婚・死亡などのようなデータを分析するのに統計学を使用しているし、また言うて見れば、平均型の完全家族が、その期間に、一部は結婚年令の上昇や結婚の持続期間のために、また一部は計画的な産児制限の実施のために——これらは労働力の経済的生産性の変化を分析するのに重要となるような諸要因であるが——減少していったかもしれないということを見い出すのにも統計学を使用している。

文学の研究者たちもまた、私がこの論文の最後で述べるように、統計学を使用している。

それ故、統計学がこれらのコースや他の諸コースに使用されようとしているとすれば、コンピュータ以前の時代に考案され、また卓上計算器に適合した計算の統計学的諸方法から、われわれは離れるべきだと思われる。というのは、コンピュータに適合したよりよい方法があるのだから特にそうしなければならない。

一つの例として、標準偏差を見い出すための計算を考えてみなさい。卓上計算器の方式においては、適切な公式は、 $\text{標準偏差} = \sqrt{\frac{(X - \bar{X})^2}{N}}$ となったかもしれない。この方法では、データを二度充分に調べる必要がある。

よりよい公式——そして、それはコンピュータに合うようにしたものだが——は、標準偏差 $= \sqrt{\bar{X}^2 - \bar{X}^2}$ であり、これはデータをただ一度充分に調べればよいだけである。

もしわれわれが生徒たちに解答を与えようとするなら、その時われわれは、自分たちが見出し得る最善の解答を彼らに与えるべきであり、そしてその時でも、幾人かの生徒が最善の解答をみつけるもっと良い方法をみつけることがまれではない。

数学において、最近の傾向は、問題の解き方を立案するのに、フローチャーティングの概念を導入しているように思われる。そして11才から13才までの範囲内のどこかにプログラミングの理論を導入することによってフローチャーティングの概念に従っているように思われる。コンピューティングのこのソフトウェアの側面と平行して、ブール代数 (Boolean algebra) の形式における論法が、「現代（原）数学」(Modern (sic) Mathematics) の教授細目の中で教えられている。そして、このようにほとんど常にセット理論 (Set theory) とブール代数の「有用さ」の具体的な例として、初歩的なスイッチング回路の使用に至るのである。これらの局面は、数学の学習に大いに有効な刺激を提供するであろう。というのは、コンピュータとコンピューティングとは、まだ幾分、魅力に満ちた話題であるが、数学は過去においてしばしばうんざりさせるものと考えられていたし、またいやいやながら、かつ抵抗を感じながら、学ばれてきたからである。しかしながら、私は、ブール代数やスイッチング回路に対する熱意が、初等のディジタル・アナログ計算器の形式で演算を行うために機械装置あるいは電子装置の設置を奨励する教師たちによって、しばしばあまりにも推進されすぎていると思う。それらの計算器のすべては、あまりにも時間を浪費しすぎるし、また多分、全く少数の熱心な生徒たちを除けば、ほとんど教育的な価値をもっていない。さらに、「現代」の教授細目においては、演算がいろんな基盤に立って教えられている。これに対しては、もっともな理由があるかもしれない——即ち、英国の度量衡制度は多元的基礎演算の例として心に浮ぶのである——が、コンピュータに二進演算が使用されているということはあまりもっともな理由ではない。それにもかかわらず、それは、あまりにもしばしば引き合いに出される理由である。少数のコンピュータ専門家たちは、このことを知っておく必要があるであろうが、他の者はあまり知る必要がないであろう。そこで、なぜそれが一つの口実として、二進演算を学ぶ理由を与えるのか——確かにいくつかのより良い理由が見い出され得るであろう。構成的な問題に帰ることにしよう。いくらかのプログラミングやまたロジック回路をも導入すれば、コンピュータの性質を帯びた何かを包含することは全く容易な仕事であり、また多分、製造工場用

の手動計算器の助けでコンピュータ・ゲームをすることによって、また生徒たちに機器・制御・記憶などの入力や出力の諸役割を演じさせ、構成諸部分を相互に関連づけているコミュニケーション・システムを操作させ、コンピュータ・ゲームをすることによって、いろいろな諸部分がどのようにして相互に作用し合うかを描写することも、全く容易な仕事である。

さきに引用したように、コンピュータは、事態をシミュレートするのに使用され得る。マックランドル(McRandle)とカーク(Quirk)によって報告されたような歴史上のシミュレーション問題において、判断を下す問題が一つの興味あるファクターとして浮び上がる。その時分析のために選び出された問題は、1899年から1914年までの時期における英本国とドイツとの間の海軍軍備競争の評価であった。そのような問題においては、取り上げられた問題の性質自体からして、その解答は仮定的なものであるにすぎないであろうということの意味する。多分、歴史家たちは、定量分析のためにコンピュータを使用する他に、近い将来、コンピュータによる一層多くのシミュレーションを使用することになるであろうと思われる。今やかなり長期にわたって、歴史家たちや人文科学分野における他の人たちは、生のデータにもう少し手を加え、またより一層有用な形に整理するというような質的目的のためにコンピュータを使用するようになってきている。そして大学レベルにおけるこの仕事の結果が、諸学校(中等学校)におけるこれらの科目の教育に、すぐに影響を及ぼすにちがいないと思われる。過去3年にわたり、連合王国において、ますます評判となったコンピュータ・ラン・シミュレーションのもう一つの例は、「ビジネス・ゲーム」(多分、ビジネス研究あるいは経済学コースにおいてであろうか)の実施である。それは、主として、学校間の競争の形をとっている。今年の「ゲーム」には数百校が参加した。各学校は一チームを出し、そしてゲームは、参加チームに対して競争的・動的・ビジネス的な場をシミュレートするのである。各々のチームは、会社の古参執行部を代表しているのである。その目的は、参加者に強制された労働条件下で同じ会社の他のメンバーたちと協力して、熟考した上での決定を下すという経験を提供することである。それは参加者に一層高度な経営の本質的な調整問題を理解させるということにおいて特に大切である。

このゲームは、競争的・相互作用的・全企業的なゲームといってよいであろう。競争的というのは、各会社がすべて他の会社と対抗し、同一の市場で競い合っているからである。相互作用的というのは、一つの会社で下された諸決定が他の会社の諸結果に影響を及ぼすからである。全企業的というのは、下される諸決定が会社の経営の広い分野、例えば、財政・生産・マーケティング・人事にまで及ぶからである。このゲームは、参加者たちが、ゲームをしているというよりはあたかも彼らが現実的に諸決定を下しているかの如くふるまえるように、できる限り实际的に計画され得るのである。 $\frac{1}{4}$ 年あるいは1年を基本的期間として、各会社は $\frac{1}{4}$ 年分の決定を下すのに約30分を認められ、これらの決定は次にコンピュータで処理され、その決定の結果は、要求されていたいくらかの市場情報報告と共に、再び会社に伝達される。各会社は、さらに次の $\frac{1}{4}$ 年のための諸決定を下すことを開始する立場にあり、また前の $\frac{1}{4}$ 年間の商売の財政的諸結果を説明しなければならない立場にあるのである。

また学校の多数の教科と相互に影響し合えるシミュレーションのもう一つの例は、交通

信号や警察官によるどんな制御形式もとらない交差点の交通の流れをコンピュータでシミュレートすることである。それぞれの道路に入ってくる車の到着や、二台の自動車がいずれも同じ空間に進入しようと待っている時、どちらの車が前進するかという見込みに関する情報を包含するデータが集められねばならない。コンピュータによるこのようなシミュレーションの利点は、どのような状況下で車の列ができ、またどんな遅滞が発生するのかを見つけ出すという目的で、自動車の様々な分布状態の影響が調査できるという点にある。右折禁止の影響（道路の左側運転の場合、また道路の右側運転の場合の左折禁止の影響）あるいは交通信号の影響についても研究されるだろう。これらのシミュレーションが研究される深度は、明らかに科目の傾向性による。しかし両シミュレーションは、モデル・ビルディングの非常によい例を提供している。もしパッケージ・コンピュータ・プログラムが使用できないとしても、いったんアルゴリズムを理解しているなら、プログラムを作るのはどちらもさしてむずかしいことではない。

言語や文字の研究においては、コンピュータは、事実上、機械の助力なしには不可能であるような徹底さや迅速さでもって基礎を提供することができる。最もたやすく機械化を認めるこれらの研究の局面は、^{ワード・インデックス} 単語索引や ^{コンコーダンス} 用語索引の作成である。コンピュータが生み出した多数の用語索引や、また単語索引が、両方ともアルファベット順に整列されたり、単語の活用語尾や語形変化の研究のために語順を逆に配列されたりして、現在作成されつつある。慣用的な用語索引の助けをかりて、われわれは、著者によってある単語に与えられた特別な意味を——著者の語集を名詞的かあるいは動詞的か、また具体的かあるいは抽象的かを分類したり、諸単語をイメージ・パターンやテーマをつくり出すためのセットに組み合わせる著者の諸方法を研究したりして——明らかにすることができる。用語索引や単語総数もまた、文体を分析するための有力な道具であるし、今日利用可能な多数の研究は、特定の著者の文体が量的に一定であり、同時代の同ジャンルの他の著者たちと異なっているということを明らかにしようとしている。この種の研究は、文体に関する興味ある問題を提起する。というのは、文体研究に関する伝統的なアプローチは、直ちに、よい文体とか悪い文体とかという価値判断の問題を提起し、量的要素というよりはむしろ質的要素が、しばしばわれわれの心の中で優先していたからである。文体への量的アプローチは、統計学に依存するところ大きく、ここでのコンピュータの利用は、以前には注意されなかった特定領域の客観的評価を提供してくれることができる。それはまた、研究されている諸例に類似の用語法についての数値的かつ完全に正確な実例を提供することによって主観面における根拠を量るのに役立つであろう。

それから、これらは、二、三の領域からのいくつかの例である。だが、例えば、私は音楽についてはほとんど知らないし、また私は、どのようにコンピュータが音楽の諸問題に応用され得るかということについては全く知らない。私は知りたいと思う。つまり、私は、音楽の諸問題に対するコンピュータの応用に関する論文を見つけないと思う。われわれは皆、いくつかの領域の問題については多分考えることができるが、多くの領域の問題については考えることはむずかしいであろう。しかしながら、もしわれわれが問題を見い出すことができるなら、生徒たちはその解答——しかもまた立派な解答を——見い出すであろうと私は信じている。

中等学校カリキュラムにおける他の諸科目とコンピュータ・サイエンスの統合

J. R. ジーラス (Dr. J. R. Zweerus)

ネーデルランド (オランダ), ユトレヒト大学電子計算センター

1. はじめに

本論文は、「コンピュータ・サイエンス」の導入が、中等学校カリキュラムの他の諸科目に及ぼすであろう影響について論述するものである。

コンピュータ・サイエンスそれ自体が卓越した教育的価値をもっていることは言うまでもない。オランダの諸学校における実験で得た経験によれば、1年間、毎週2時間の授業で、コンピュータの実習で当面する本質的な問題の十分な扱い方を提供することが可能であるということが明らかになった。その時間内において、非常な社会的重要性をもつコンピュータ応用に対する十分な注意が与えられ得る。一つの副産物として、一つの思考方法・一つの習慣が教え込まれる。われわれはこの習慣を「組織的・分析的・アルゴリズム的」に特徴づけることができる。その上、この習慣は、早期(第2学年あるいは第3学年)に形成することができる。それから、コンピュータ・サイエンスがカリキュラムにおける他の諸科目の間で、ユニークな位置を占めるように思われる。「ほとんど操作的でない」と最もよくその特徴をあらわし得るレベルにまで、生徒を導くためには、ほとんどすべての科目と一体となって何百時間かの授業が必要である。コンピュータ・サイエンスによって、われわれは、60時間から80時間ぐらいの授業の後で、実際に無制限の応用をとまなうある科目が十分に習得され、コンピュータを使って実際に生徒が何かをなすことが可能になるという立場にある。

さて、われわれは、たった1年でその問題をそのままにしておくことはまことに残念であると考えずにはいられない。そして、価値ある追跡調査が案出され得るかどうかという問題が生じてくる。

2. どういう種類の追跡調査か

コンピュータ・サイエンスにおける多数の興味ある論題から考えて、高学年においては、いくつかの問題をより詳細に考察することが明らかなように思われる。われわれはスタックのサブルーチンやリカーションやプログラミング、またリストやトリーのようなデータ構造、さらにまた周辺装置のバック・トラッキングやタイム・シェアリングや情報などのような諸事項について考えることができる。このことはもちろん応用に対する一層広大な可能性を開くであろう。非常に興味ある諸コースが、この方向で提示され得るし、また明白な理由で、商業と工業が、この種の教育への興味を示すことは明らかである。

しかしながら、普通教育におけるコンピュータ教育の目的(スロイス氏 van der Sluis を参照)は、全く素通りされることになるであろう。この教育の基本的な諸目標——アルゴリズム的・組織的・モデルビルディング的な——は、基礎の第1年に充分提供された。即ち、それに加えて教えられるあらゆるものが、まもなく専門主義へと「変質する」。

将来のコンピュータ専門家のためのしっかりした踏み台を提供することが、われわれの

意向ではない。

それ故、追跡調査は容易に実現され得るであろうけれども、私は、この意味での追跡調査^{フォロー・アップ}に対して強く反対したいと思う。われわれが真に望むことは、習得した知識や習慣を直接的な方法で、即ち、技術細目やより高度な技術をいじくりまわさないで、働かせることである。というのは、1年後には、収獲物は熟し、多くの利益をあげて収獲され得るからである。

われわれは、もっと賢明な追跡調査のために二つの可能性に注目する。

1. 単にコンピュータ・サイエンスだけにとどまらず、もっと大規模の方法論的・教授法的原理として、思考のアルゴリズム的方法（機械的な事柄の認識と分離やそれらのアルゴリズム的公式化、例えばフローチャートのようなもの）を使用すること。
2. 生徒が、物理学・化学・生物学・社会——自然地理学のような学科の学習において、コンピュータの助けをかりて問題を解くことができるという事実を充分利用すること。コンピュータは、これらの科目における視野をかなり広げることができるし、またあまりにも伝統的な諸方法によった場合よりも、自然科学における思考と学習活動の方法に、はるかによい洞察力をもたらすことができる。

これらの二点でもって、広範囲の教育研究の一章が計画された。そしてそれは、懸命に探究され、将来に対して大きな希望をもっている。効果のあがる苦心は、多種多様な教育専門家たちのチームに任されなくてはならない。問題と可能性とがあまりにも大きいので、簡単な論述で一人の人間が論ずることはできない。

コンピュータ・サイエンスが、中等学校において確固たる地位を占めるまでには数年を要するであろうし、また前述したようなコンピュータ・サイエンスの統合を目指す実験がまだなされていないので、われわれの考察は、推測や不確定という大きな限界を背負うことになるであろう。

3. 教授法的・方法論的な原理としてのアルゴリズム学

アルゴリズム学の力は、主として、核のまわりの全く機械的な性質^{ルーチン 性}をもっている一見無秩序な諸システムを組織化する能力である。その諸局面のいくつかがもっている機械的な性質^{ルーチン 性}を認め、次に、それらの諸局面を、それ自体として、即ちアルゴリズムとして提示することが、科学の重要な仕事の一つである。多くの人々は、機械的な性質が創造性に反するものとして、これに反対する強い感情をもっている。しかしながら、われわれは、機械的な事柄のためにアルゴリズムを工夫することは、全く機械的な仕事ではないということ^{ルーチン}を心に留めておくべきである。その上、根本的に機械的な事柄を不正確かつ無秩序な仕方^{ルーチン}で提示することは、無意味である。このようなことは、単に進歩のさまたげになるだけである。

教授や提示のばやけた方法に、遺憾ながら、あまりにもしばしば、教育の多くの部門においてでくわす。それで提示をアルゴリズム化することが考えられるかどうか、かつ役立つかどうかを研究することは、やりがいのあることである。

この問題は数年間、東ヨーロッパの国々において、教育の専門家たちの非常な注意を引いてきた（例えば、ランダ Landa によって書かれた書物を参照のこと）し、そしてわれ

われは、いくつかの例を指摘することで充分であろう。伝統的な学校数学は、学ばなければならない要素を含んでいるが、これらの要素は、本質的に、通常これらの要素に払われる注意にほとんど値しないのである。われわれは、多項式を用いた巧みな操作・因数分解・合成関係の微分法・それらを標準形に導くことによる不等式の解法・二次方程式の解法・一次方程式の解法また幾何学におけるあらゆる諸問題について言及する。そこで解法は、おおかた、一連の標準問題に答えることによって、見い出され得るのである。これらの事項の有用性は、議論の対象となり得るが、それらが教えられる時には、やはりここでも、これらの科目の本質を正しく認める方法で、これらの事項が提示されるべきである。そして、この事は、ほとんどの教師があえて自白しているよりもなお一層機械的である。小規模の諸実験は、フローチャートが役立つということをすでに示している。

化学においては、「分析化学」という一章が、フローチャートによって提示されることができる。その利点は、遂行される作業の順序が描かれている精密さと明白さである。「あなたは、塩と砂とインキの混合物をどのようにして分離するのか」という種類のちょっとした問題は、生徒がフローチャートによって最もよく解くことができる。つまり、生徒は、その時、なぜか・何か・について、また正しい順序について非常に注意深く考えることをしいられるからである。

生物学においては、植物の決定が、よく知られている例である。それは、古くからアルゴリズム（植物区系）として公式化されてきた。諸言語（特にラテン語やドイツ語やフランス語）を教えるにあたっては、文法構造の識別が、しばしば不可欠である。それは、悪名高い文章分析の過程に至るものであり、それは、しばしば不注意で混乱的な仕方では提示される科目である。本来、文章分析は、おもしろくないが、それは、まさに必要なのである。ここにアルゴリズム的アプローチの可能性があるのである。

ランダによって書かれた上述の書物は、参照にされるがよい。それは、またこの分野でなされた学校の授業での諸実験についての評価を示している。

結論として、われわれは、ルーチンやアルゴリズムが、高度に「創造的」な諸問題において演ずることができる役割をはっきり表わす例について論じよう。音楽学校の音楽教育においては、和声・対位法・通奏低音の労作・総譜の構造分析のような理論的な諸問題に多くの注意が払われなければならない。これらの科目の主要部は、単に習い覚えられべき機械的なものから成っている。この分野の教科書を概観すれば、これらの技能を有効に消化するのに非常に障害となる提示の矛盾と混乱とが明らかである。多くの重要な項目は、アルゴリズムによって実際的に完全に公式化され得るし、またその過程ではっきりと明白になるのである。

和音の型を見い出したり、その前後関係における和音の音色機能や、通奏低音の基本的標準的な労作を決定したりすることでさえ、大部分はアルゴリズムとして提示され得る活動である。このことは、音楽教育にある効率をもたらすであろう。その時、音楽教育は、はるかに興味ある諸問題（「コレリ Corelli やテレマン Teleman のような人々が、どのようにして通奏低音部をつくり出したのか。」というような）に注意を払う余地を残すことになるであろう。

4. コンピュータ・サイエンスと数学

中等学校段階でコンピュータ・サイエンスを教授する時、われわれは数学を必要としない。数学は、われわれの見解においては、コンピュータ・サイエンスの魅力の一つである。もちろん、数学的思考方法は含まれるが、数学的技術は含まれない。他方、数学は、コンピュータ・サイエンスによって深くかつ好ましい影響を受けることができる。世界中で学校数学は、改造されつつあるが、この改造は通常、学校数学のいくつかの部分の理論的背景を、もっとはっきりさせるという趣意であり、さらにまた、現在の大学の関心となっている諸科目を、理解しやすい形で学校のカリキュラムに組み入れるという趣意でなされつつある。ところで、この改造はそれ自体としては悪くないかもしれないが、この改造から実際に影響を受ける少年・少女たちのグループが、なお一層畏縮してしまうという望ましくない結果をもたらすのである。論理習慣・精密さ・普遍性に対する感覚や、問題から非本質的要素を取り除くという常に彼らの要求されてきた能力を大多数の生徒にいまだかつて発達させることができなかったというのが、学校数学の宿命である。大多数の者にとって、この科目は失望であり、無駄な負担であり、上級階梯への進学を絶えずおびやかす障害物である。

それ故、他の改造が大いに必要である。多くの生徒にとって、数学との可能な関連性は、応用面で見られるだけであり、そしてこれらは、まさに最初から提供されるべきであり、このことは可能であり、またなされるべきである。とりわけ、学校カリキュラムのいくつかの他の諸科目に対して、非常に重要な数学の応用分野は、学校数学が常にまとってきた明白な拘束服のために、相変らず、閉鎖されたままである。即ち、方程式は明解に解かれねばならないし、級数は明解に求和されねばならないし、積分は、明白な原線をもたねばならない、などである。数学の可能な応用が、このことに非常に打撃を受けるのは明白である。コンピュータの助けをかりて、この明白な制限を排除することや、刺激的な応用の大きな分野を開発することが、全く可能である。しかし、それより以上に、数学それ自体は、このことから大いに利益を得ることができる。伝統的なプログラムには、数学的行動の重要な諸局面が欠けているということをわれわれは感じる。即ち、諸関数の定性的行動・大きさの順序・切り捨てたり繰り上げたりする技術、要するに、分析の真に重要な面（ただし初等教育段階であれば）に対して感じるのである。数学のプログラムの最小限の拡張が、魅惑的な方法によってこれらの活動を行うための可能性を開くであろうということをわれわれは理解するであろう。それについては、われわれは、有効な諸拡張をすぐに期待することができる。なぜなら、伝統的な学校数学の大きな諸章は、都合よく中断され得るからである。次に述べる事柄において、われわれは、主として大学入学前の中等学校の上級階梯にわれわれの注意を向けるであろう。

4. 1. 数値数学：便法と応用分野

数値数学は、応用数学における特殊な部門であり、それ自体は、学校プログラムに導入することを考慮するに値しない。コンピュータ界に対するこの科目の重要性もまた導入への理由にはならない。それにもかかわらず、次の二つの理由から、学校プログラムにいく

つかの数値項目を挿入することについて、われわれは非常に強い感じをもっている。

1. 数値数学は、例えば、自然科学に非常に重要である非凡な応用数学を取り扱うための十分な機会を提供する。
2. 数値数学は、その科目を正当に取り扱う方法によって練習の（われわれが教科書の中で遭遇する多くの堅苦しくかつ意気消沈するような応用に反して）適切な機会を初等解析（微積分学）に与える。

詳細はさけて、われわれは、自分たちがなぜそれらに興味を感じるかを、動機づけと一緒に、いくつかの諸局面について述べよう。

A. 方程式の解法

二等分法は、根に近似するための非常に簡単（で有力）なアルゴリズムである。それは、代表的なコンピュータ・アルゴリズムであり、容易にプログラム化される。収束速度は容易にみることができるし、また規定された許容に達するようにその過程をどのようにして停止するかという方法もまた明らかである。しかし、このアルゴリズムを首尾よく適用するために、グラフを描くある技能が要求されるし、関数の増減が、例えば、導関数などで調べられねばならない。共同して作用するアルゴリズムとして、ニュートン-ラプソン（Newton-Rapson）は、接線を引くことによって幾何学にも、またテイラー級数の第一次項の後を打ち切ることによって解析的にも取り扱われ得る。ニュートン-ラプソンが第二項過程であることは、簡単な方法で示され得る。その上、学校数学に現われるとわれわれがみなしたいある局面——即ち近似——が生じてくる。これらの反復諸過程は、非常に具体的な方法で、むずかしい極限の概念にいくらかの光を注ぐのである。反復を停止する問題にいくらかの注意を払うことが望ましい。これらの停止方策は、自動的な諸過程の代表であり、その他の点で威力を発揮するアルゴリズムの弱点をはっきりと指摘するのである。

B. 積分法

この論題は、近似の基礎概念をもつリーマン和（Riemann-sums）の極限として積分の導入と密接に一致する。被積分関数を一次関数に近似することによって、台形公式と中点法則が得られる。これらの単純な場合に対しては、剰余項が、容易に導き出される。積分は、今や、これらの公式を反復適用することによって規定された許容範囲内で計算できるのである。ここでもまた、被積分関数の第二次導関数に対して上限を見つけ出すような、初等解析を使用する機会がある。制御階段をもつ積分のような問題でさえも、理解できる範囲内にあるし、そして、例えば、最後の解答を得るのに被積分関数の主要な貢献があるところに洞察力を与えるのである。

C. 級数和

級数の初めの多数項をコンピュータに加えさせることによって、非常に多様な収束級数の和が得られる。その先どのくらい行わなければならないかということは、大多数の剰余項を考察することによって概算することができる。その標準技法は、幾何級数と比較する

ことであり、そしてこの級数は、これによって、解析においてもつ状態、即ち比較の対象となる状態を得るのである。

いくつかの緩収束級数でさえも取り扱うことができる。剰余項の概算や収束の促進は、積分目標によって処理され得る。この目標は、小さな略図の助けで非常に簡単に扱われ得るし、またその上、この目標は、初等陽原始関数で何かをなすための機会を提供する。

要するに、大きさの順序・定性的振舞・注意深い推定などに対する感覚を発達させることが重要な問題である。

D. 関数表

上述した諸問題の最初の応用として、われわれは、平方根・対数・指数関数・円関数のような普通の関数の計算を考えてみる。これを行うためのアルゴリズムは、明白な諸方法で与えられ得る。多くの不可解なものを取り去ってくれるので、生徒たちはこれを好きになるだろう。即ち、彼らは、コンピュータで、彼ら自身の表を作り出すことさえ出来るであろう。

ここで、一次補間法の問題に対しても有効性が出てくる。一次補間法の問題は、剰余項と一緒に容易に取り扱うことができる。表にされねばならない関数の導関数による容易な操作は、「自分の対数表が、一次補間法によって5桁の精密度を得るためにどのくらい広いスペースをあげねばならないか。」という問題に答える。再び近似の概念が中心となり、かつ有効となる。

E. 微分方程式

微分方程式は、主として本質的に不連続な諸モデルを、連続的に理想化したものである。それでは、微分方程式については忘れて、直接、不連続モデルを計算しよう。そのモデルを考案してその諸結果を解釈することは、計算なんかよりはおもしろいものである。それは、仮説をたてたり、モデルを組み立てたり、計算をしたり、実証したり、食い違う場合にモデルを変更させたりなどする科学者の活動に真の洞察力を与える。

われわれの諸目的に関連しているのは、第一階の方程式である。そこでは、ある量の変化率が、その量のある単純関数である。われわれは、小刻みにその解を築き上げ、その間導関数は一定とみなされるから、われわれは非線形について悩む必要はないのである。

より一層小刻みなサイズで計算をくりかえすことによって、それは不正確な方法、その表現が気に入らなければ、下等な方法ではあっても精度を十分にコントロールすることができる。ここでも再び近似の概念が働くのである。

この単純な計算概型によって種々様々な数学的なモデルが、諸現象を記述したり、解釈したり、予測したりするのに使用され得る。われわれは、「実験数学」というようなものを恐れるべきではない。実験数学は、見当違いの固苦に固執することよりは一層の楽しさや洞察力をしばしば生み出すのである。とにかく、現代の応用数学者、例えば操作的分析者のような応用数学者は、この実験数学を恐れない。

4. 2. 上に略述したプログラムは、一見したところ、手ごわいように思われるが、実は、それほどではない。そのプログラムは、若干のアルゴリズムからなっている。そのアルゴリズムのすべては、一つの基本概念——つまり一次関数による局所的近似で、従って威力のある道具を生み出す基本概念——を中心としてしっかりと組織されている。しかし、これに関連して初等解析を駆使するある技能を習得することによってごくわずかな時間が短縮される。しかし、これこそ、私が有利な点とみなすことができるものである。なぜなら、それは大部分の学校数学に思慮深い道具立てを与えるからである。

正しい提示を見つけ出すためにあるかなりの教授法的な下準備がなされねばならないであろう。というのは、こういう風に学校数学は、確かに容易なものではないが、もっと楽しく、おもしろく興味あるものになるということは、否定されるはずがないからである。しかしながら、われわれは、生徒たちがよりよく動機づけられ、そして、いずれにせよ、あまりうんざりしないであろうということが期待できる。

5. 自然科学における応用

物理学・化学・生物学や社会地理学のような他の諸科目のための学校プログラムが、新しい可能性に照らして再吟味されるべきだということはもちろんのことと思う。われわれは、魅力的で鋭敏な方法によって重要な科学的諸活動に生徒たちを導くことが全く可能だということを示すような例を提示するだけにしよう。

5. 1. 成長と反応のモデル

これらのモデルは、定数係数をもつよく知られた第一階微分方程式——即ち $y' = Ay$, $y(0) = a$ ——でしばしば満される。モデルを変更させることは、通常、非線形を導入することを意味する。われわれは、離散モデルを計算するのだから、われわれはそれを恐れる必要はない。手段として（最少量のプログラミングで、！）コンピュータを使用するので、コンピュータは今や、この単純な方程式を中心として一つのプロジェクト・エデュケーションを組織することを可能にする。そこでは、われわれは、望む限りその方程式の右辺に摂動を入れることができる。そこで、われわれは、生徒たち自身に、実験・モデル作成・検証・予測的断定・モデル変更などの手順に次々従わせるのである。

最初の例として、われわれは、ペトリ皿の中のバクテリアの群体の成長を考える。これは、生徒たちが（顕微鏡の下で計算しながら）自分自身で観察することができるすばらしい実験である。一定の初期値に対して、その成長が最初にそのモデルに一致して成就するということを、コンピュータで確かめることができる。定数 A を実験によって推定することができるし、周囲の諸条件（気温、食物の種類）への定数 A の依存性を決定することができる。次に、予測的断定が下され、それによって、やがてそのモデルによる偏差が生ずるであろうということや、また媒介変数の調整によって説明され得ないということが明らかになるであろう。その問題について考えることや学級における論議は、計算ですぐ確かめられ得るモデルの純化をうながすであろう。致死因子、あるいはまた個体数の増加にともなう食物の欠乏も考慮に入れられ得る。例えば、個体群の数に伴って直線的に増加するような、有害・無益な生成物の発生は、完全な絶滅の結果となり得るのである。

種々の仮定が時には同じモデルを作り出すことができるような洞察力は、最も教育的な価値を有するのである。それは、「自然の法則」の概念をかなり新しく（かつ正しく）見えるようにする。生徒たちは、自然の法則が心づけのマージンをともなった人工構成であることに気づくであろう。

多数の他の興味ある例が、マラリア伝染病の蔓延あるいは捕食食肉動物の社会のような生物学の中に見られ得る。

同様な例が、化学の教授においても考えられ得る。均質な稀薄溶液中の反応機作を取り扱う際に、われわれは由緒ある論題であるグルベルグ（Guldberg）とヴォーゲ（Waage）の法則を頭に浮べる。しかし、学校では、この法則は、ほとんど役に立っていない。これは驚くべきことではない。なぜなら、本質的にそれは、ほとんど非線形なものを含む微分方程式群となる導関数についての所説だからである。

しかし、コンピュータによって、興味ある一連の諸実験が考案され得る。そしてそれは、現象反応速度や、温度と平衡との依存度について完全な洞察力を与えてくれる。媒介変数は、反応定数を推定する時には温度を一定に保つというような、目的のために計画された諸実験によって推定され得るのである。

適当に選んだ反応が、どれくらいたったら平衡状態に達しているかを計算することさえも可能である。（なぜなら、二つの方程式よりなる一つの系は、われわれの穏当な組み立てによって何ら支障をきたさないからである。）

われわれはこの方法で続けることができる。無数の例を、自然諸科学に見い出すことができるし、また既存のカリキュラムの修正は、有望であるように思われる。

6. 確率と統計

ネーデルランド（オランダ）において、これらの項目を中等学校カリキュラムに導入するというのが、専門家たちにとって意見を異にする論題となっている。いろいろな教科書があり、そして諸実験がかなり大規模におこなわれてきた。われわれの暫定的な結論は、あまりにも多くの時間が投票用の象牙の球・分布による巧みな処理・二項係数による代数的操作・記述統計学などに費やされているが、真の目標は達成されていないということである。即ち、統計学的思考方法・他にとりうる方途に対する仮説の検証・それに付着した信頼区間をもつ媒介変数の推定などである。これらの事柄の完全で精密な処理を成し遂げるには、明らかにあまりにも多くの時間がかかる。その上、いくらかの実際の統計を扱うのに必要とされる数学的資料は、あまりにもむずかしくてカリキュラムに入れることはできない。コンピュータの助けをかりて、われわれは、統計学のあるきわめて重要な諸局面に実験的に導入することを予期し得るのである。その便法は、ここでは擬乱数表の利用であり、それは、規定された分布をもつ母集団から大標本を生成させるのである。これは、現象の「確率変数」に堅固な理解力を与えること・平均の揺動を研究すること・標本分散が標本の大きさによって減少するのを実験的に確かめることなどを可能にする。

確率理論の極限諸法則でさえも、実験的に論証され得る。（中心的極限定理が何に関するものであるのかをみるために、プログラムを作成したり、プログラムを実行したりするのに全く時間がかからない。）

模擬実験は、「他にとりうる方途に対する仮説のテスト」に対して実感を与える。こういう風にテストの威力さえも、他にとりうる方途の仮説の中で媒介変数^{パラメーター}を移動さすことによって、論議され得るのである。信頼区間の意味を、明瞭にかつ得心のいくように論証することができる。

その上、二項式・正規・ポアッソン (Poisson) のような必然分布を、(4) を使って計算することができる。正規分布による二項式分布の近似や食い違いの評価のようなむずかしい問題でさえも、純粹に実験的な方法で取り扱ったとき明らかにされ得る。

これらのシミュレーション方法が、他の諸科目、例えば生物学にうまく適用され得るということは明らかである。そこでは、メンデルの諸法則をコンピュータによってシミュレートすることができる。あるいは社会地理学において、人口爆発の問題が論議されるときも同様である。これは、(5.1.) で述べたようなモデルで行われ得るが、それがまたマイクロ・スケールでもシミュレートされ得る。そこでは、「一組の夫婦は、三人以上の子どもをつくることは許されない」というような測度の影響力を、確率の背景によって学習することができる。

7. 結 論

コンピュータ・サイエンスの穏当な量は、深くかつ有益に中等学校カリキュラムの諸内容に影響を与えることができる。われわれが、何ができ何ができないかという明確な洞察力をもつ前に、多くのことがなされなければならないであろう。教師（そして特に、これからの教師）は、この新しい分野の探究を熱心に押し進めなければならない。コンピュータ・サイエンスだけでなく、より広範囲な国際ジャーナルが、急速な前進のための必要な媒体となるであろう。

数学や数学の応用に関する限り、適切な働きをするために、われわれは、非常にきびしい中等学校の的はずれの必要条件からわれわれ自身を解放し、また、応用のきく・活気のある・社会的に使用される数学をさがしはじめることが、きわめて重要であるということをおはくりかえし述べたい。ここで、統計学の天才であるロナルド・フィシャー卿 (Sir Ronald Fisher) の数学的操作について言われてきたことが重要な意味をもっている。即ち、「きびしさではなく、活力である。」と。

文 献

ランダ (L. N. Landa), 『教授におけるアルゴリズム』 (Algorithmierung im Unterricht), ベルリン, 1969年。

スロイス (A. van der Sluis), 『中等学校におけるコンピュータ・サイエンス』 (Computer Science in Secondary Schools), (このゼミナールにおいて発行された論文)。

(昭和52年10月31日受理)